

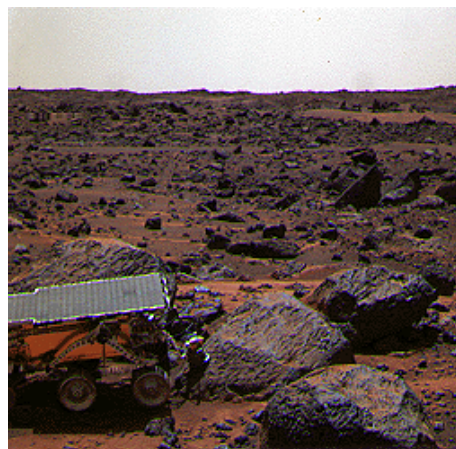
Baggrund

Bølgelængden af synligt lys ligger i området 400-750 nm. Ting med en mindre rumlig udstrækning kan vi ikke se med vores blotte øje. Det betyder, at hvis vi vil “se på” hvilke atomer et ukendt stof består af, skal vi anvende lys med en bølgelængde som svarer til atomernes udstrækning (ca. 0.1 nm). Lys med en bølgelængde i intervallet 0.01-10 nm, svarende til fotonenergier mellem 124 eV og 124 keV, kaldes Røntgenstråling efter W. Røntgen, der opdagede denne form for lys i 1896.

Røntgenstråling gør det altså muligt at studere materialers grundstofindhold og atomare struktur og er derfor i dag en af de mest udbredte metoder inden for en lang række teknologiske områder og forskningsfelter. Eksempelvis finder Røntgenstråling anvendelse i biologien til studier af celler og komplekse biomolekyleres struktur, i medicinen til Røntgenfotografier og kræftbehandling og i forskningen af højteknologiske materialer såsom superledere, katalysatorer, chips osv.

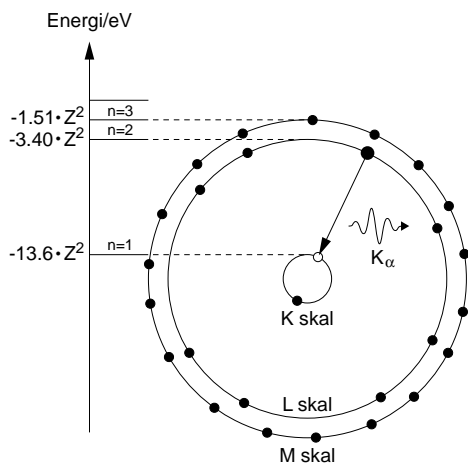
Selv inden for rumforskningen benyttes Røntgenstråling. På NASAs Pathfinder mission til Mars i 1997 medbragte det lille køretøj “Sojourner” et Røntgenanalyseapparat til at studere grundstofsammensætningen af forskellige geologiske områder på Mars (se figur 1).

Denne øvelse vil illustrere hvordan Røntgenstråling produceres og benyttes til at studere faste stoffers sammensætning.



Figur 1: Billedet viser Sojourner med sit Røntgenapparat rettet mod en Mars klippe (*kilde: NASA*)

Atomers struktur og Røntgenstråling



Figur 2: Billede af Bohrs atommodel. En overgang til K-skallen er vist, kaldet K_{α}

Den såkaldte “karakteristiske Røntgenstråling” kommer fra det indre af atomerne. Forståelsen af strålingens energi stammer fra Niels Bohrs atomteori. Ifølge denne teori er elektronerne anbragt i bestemte skaller med energier:

$$E_n = -13.6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ eV} \quad (1)$$

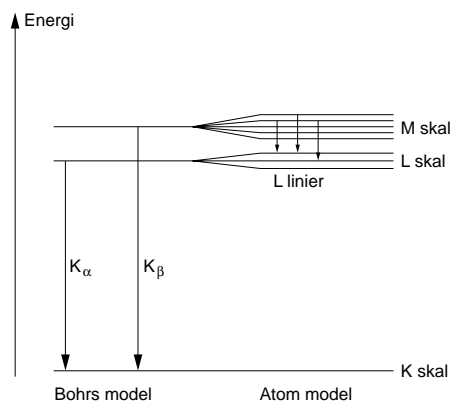
hvor kvantetallet $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ beskriver de forskellige skaller (K, L, M, N...) og Z angiver antallet af protoner i kernen. Hvis der mangler en elektron i eksempelvis K-skallen af et atom, er atomet eksiteret. Det er nu muligt for en elektron i L-skallen at henfalde til K-skallen under udsendelse af en foton. Fotonens energi svarer til energiforskellen mellem L- og K-skallen:

$$E_{\text{foton}} = h\nu = E_L - E_K \quad (2)$$

Dette er illustreret i figur 2. Det er også muligt at få Røntgenstråling ved at en elektron henfalder fra M- til K-skallen. Hvis der på tilsvarende vis mangler en elektron i L-skallen kan Røntgenstråling opstå p.g.a. henfald fra M- til L-skallen.

Bohrs atommodel beskriver i virkeligheden kun atomer med en elektron. En mere detaljeret beskrivelse af elektronernes energiniveauer, når der for eksempel er flere elektroner i atomet, kræver et nøjere studium af atomfysik og udelades derfor her. Men resultatet ændres ikke radikalt fra Bohrs beskrivelse.

Skitsen i figur 3 sammenligner Bohrs model med en mere realistisk model, og det ses at den væsentlige forskel er, at den nøjere beskrivelse giver anledning til at elektronerne i L,M,...-skallerne kan have lidt forskellige energier. Som konsekvens heraf er der flere Røntgenovergange med forskellige energier i modsætning til den simple Bohr beskrivelse. I appendix 1 er et fuldstændigt diagram angivet over de mulige Røntgenovergange.



Figur 3: Bohr's en-elektron model (til venstre). Til sammenligning er vist et atom med mange elektroner (til højre)

“Moseley's formel”

Hvordan afviger Bohrs en-elektronmodel fra en mere realistisk fler-elektronmodel?

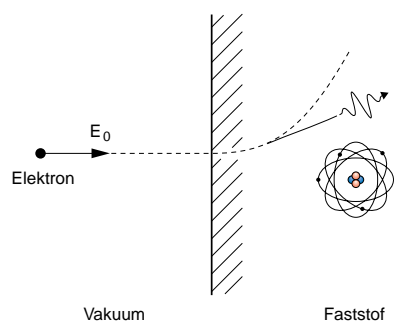
I en-elektronmodellen vil den negativt ladede elektron (-e) i K-skallen føle sig tiltrukket af den positivt ladede kerne (+Ze). Men er der nu mange elektroner i atomet må de nødvendigvis placeres i skaller med højere energi (L,M,N,...). En elektron, som sidder i en sådan højere energibane, er placeret længere væk fra kernen og føler sig stadigvæk tiltrukket af de Z protoner i kernen. Men der er nu en vis mængde negativt ladede elektroner mellem kernen og den yderligt siddende elektron. På grund af afskærmningen fra de mellemliggende elektroner, vil den yderligt siddende elektron altså føle, at den effektivt tiltrækkende kerneladning er mindsket – de mellemliggende elektroner “skygger” altså for kernens tiltrækning, så den yderligt siddende elektron føler sig tiltrukket af en kerne med en effektiv ladning på $+[Z-\sigma]e$. σ er skærmningskonstanten og angiver hvor kraftig skyggeeffekten er. Tages skærmningskonstanten i betragtning ændres Bohrs formel til Moseley's formel:

$$E_n = -13.6 \frac{[Z - \sigma]^2}{n^2} \text{ eV} \quad (4)$$

Opgave 1 (valgfri)

Empirisk har man for kobber fundet at $\sigma_K = 3.3$ og $\sigma_L = 12$. Beregn bindingsenergiene for elektroner i K-skallen og L-skallen, idet der tages højde for skærmningskonstanterne. Bestem herudfra K_α for Cu. Sammenlign med værdierne i appendix 2. Er størrelserne på skærmningskonstanterne hvad du ville forvente?

Bremsestråling

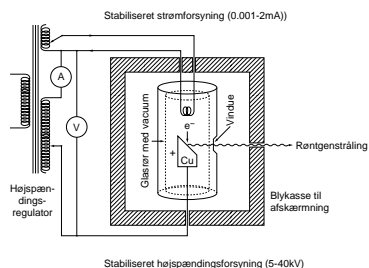


Figur 4: Frembringelse af bremsestråling

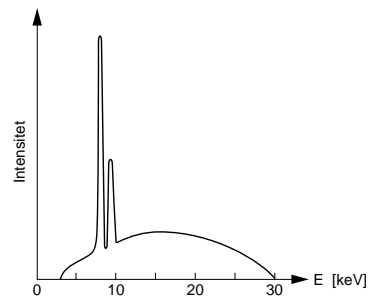
Den karakteristiske Røntgenstråling udmærker sig ved at fotonerne har helt veldefinerede energier. Dette står i modsætning til en anden form for Røntgenstråling, nemlig bremsestrålingen. Bremsestrålingen fremkommer f.eks. når energirige elektroner bevæger sig ind i et fast stof (se figur 4). Elektronernes bane vil afbøjes p.g.a. vekselvirkningen med atomerne i det faste stof. Herved nedbremses elektronerne (negativ acceleration). Man kan inden for elektrodynamikken vise, at ladede partikler som accelereres vil udsende en del af deres kinetiske energi som stråling. Da elektronerne maksimalt kan miste hele deres kinetiske energi, E_0 , må fotonerne fra bremsestråling have energier E i intervallet $0 < E < E_0$. At ladede partikler udsender elektromagnetisk stråling er en velkendt effekt i forbindelse med udsendelse af radiobølger. Disse udsendes ved, at en vekselspænding tilføres en radioantenne. Denne spænding får elektronerne i antennen til at svinge, dvs. de accelereres og udsender stråling.

Røntgentrøret og strålingen fra det

I øvelsen producerer vi Røntgenstråling med et Røntgenrør, der ses skitseret på figur 5. Princippet bag Røntgenrørets funktion er følgende: Elektroner frigøres fra den negative glødetråd og accelereres mod den positive Cu-blok. Accelerationen af elektronerne sker ved at pålægge en spændingsforskel V mellem Cu-blokken og glødetråden. Nedbremsningen af elektronerne i Cu-blokken giver anledning til bremsestråling som beskrevet ovenfor. Desuden vil strålingen fra Røntgenrøret også indeholde karakteristiske Røntgenlinier (hvorfor?).



Figur 5: Røntgenrøret



Figur 6: Spektret fra et Røntgenrør

Opgave 2 (regnes hjemmefra)

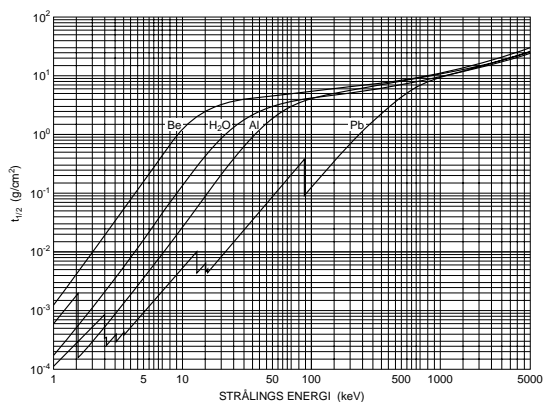
Figur 6 viser spektret fra et Røntgenrør. Identificer bidraget fra den karakteristiske Røntgenstråling samt bidraget fra bremsestrålingen. Bestem ved hvilken spænding V spektret er optaget.

Absorption af Røntgenstråling

Når Røntgenstråling passerer en prøve reduceres strålingens intensitet afhængigt af prøvens tykkelse og sammensætning. Denne observation kan beskrives ved følgende udtryk :

$$I = I_0 \cdot 2^{-t/t_{1/2}} \quad (5)$$

Her er I/I_0 Røntgenstrålingens intensitet efter/før passagen. Parameteren t er proportional med prøvens tykkelse d (mere præcist: $t = d \cdot \rho$, hvor ρ angiver prøvens massetæthed). Halveringstykkelsen $t_{1/2}$ beskriver prøvens evne til at absorbere den indkommende Røntgenstråling og er således afhængig af dennes grundstofsammensætning. Figur 7 viser $t_{1/2}$ for nogle materialer. Bemærk at absorptionen stiger ($t_{1/2}$ reduceres) for tungere grundstoffer og lavere Røntgenenergi. De interessante "dyk" i $t_{1/2}$ ved veldefinerede Røntgenenergi kaldes absorptionskanter (se opgave 4).



Figur 7: Halveringstykkelser $t_{1/2}$ for udvalgte materialer

Opgave 3 (regnes hjemmefra)



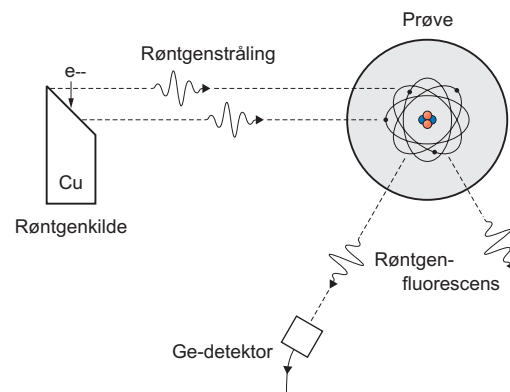
På Kommunehospitalet i Århus benyttes Røntgenstråling med en energi omkring 50 keV til at "Røntgenfotografere" patienter med knoglebrud. Ved en Røntgenenergi på 50 keV er halveringstykkelsen $t_{1/2}$ for kul 5.6 g/cm² og for Calcium 1.0 g/cm². Hvor meget falder intensiteten af 50 keV Røntgenstråling når det passerer 1 cm kul? 1 cm Calcium? Forklar på baggrund heraf, hvorfor det er muligt at lave Røntgenfotografier.

Opgave 4 (diskuterer hjemmefra)

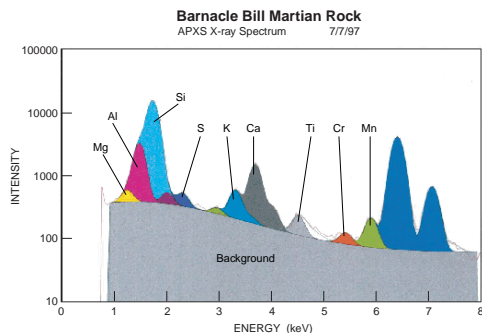
På figur 7 svarer hver enkelt absorptionskant til en brat stigning i absorptionen af Røntgenstråling ved den pågældende energi. Aflæs nu på figuren den præcise energi for en (eller flere) kanter for grundstoffet bly. Sammenlign de aflæste værdier med bindingsenergiene for bly (appendix 2) og prøv at give en forklaring på hvilken mekanisme der ligger til grund for absorptionskanterne. Bemærk at hvert grundstof har sit eget sæt absorptionskanter. Derfor kan man bruge målinger af absorptionskanter fra en ukendt prøve som "fingeraftryk", der afslører hvilke grundstoffer der befinder sig i prøven.

Røntgenfluorescens

Røntgenfluorescens er en meget anvendt metode til at bestemme en prøves grundstofsammensætning. Princippet bag fluorescens-teknikken er skitseret i figur 8. Her anvendes en Røntgenkilde til at bestråle en ukendt prøve. Røntgenkilden kan være et Røntgenrør der fortrinsvis udsender et kontinuert spektrum (bremsestråling), eller et radioaktivt materiale der udsender Røntgenstråler med en veldefineret energi (karakteristisk Røntgenstråling). Fotoner fra Røntgenkilden ioniserer atomer i prøven, eksempelvis ved at slå elektroner ud fra K-skallen. Hullerne i K-skallen bliver nu fyldt op under udsendelse af K_{α} og K_{β} stråling som detekteres. Den efterfølgende analyse af den detekterede Røntgenfluorescens afslører straks hvilke grundstoffer prøven indeholder.



Figur 8: Røntgenfluorescens



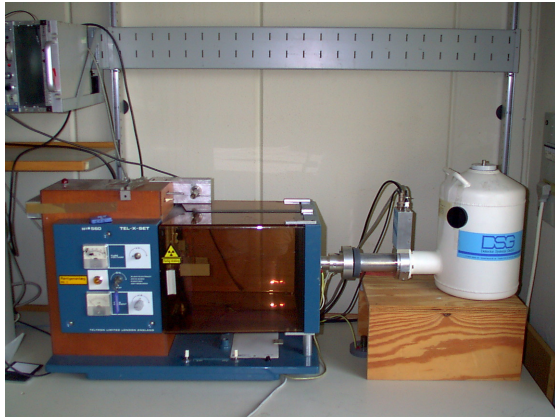
Figur 10: Røntgenfluorescens af Barnacle Bill (kilde: NASA)

Opgave 5 (regnes hjemmefra)

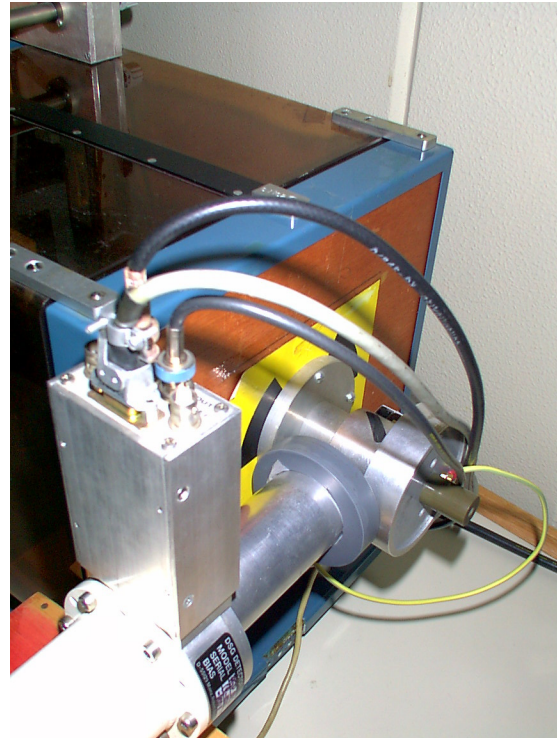
NASAs Pathfinder mission til Mars i 1997 medbragte et lille køretøj "Sojourner", der ombord havde et Røntgenanalyseapparat. Det bestod af en ^{241}Am radioaktiv kilde, der bl.a. udsender 26 keV Røntgenstråler, og en Røntgendetektor. På figur 1 (se indledningen) ses Sojourner med sit Røntgenanalyseapparat rettet mod en Mars klippe. Figur 10 viser et spektrum, som blev sendt ned til Jorden optaget ved den klippe, der blev døbt "Barnacle Bill". Der er også angivet hvilke grundstoffer, der giver anledning til de forskellige toppe. Hvilket grundstof stammer de to blå toppe nær 6.5 og 7 keV fra?

Eksperimenterne

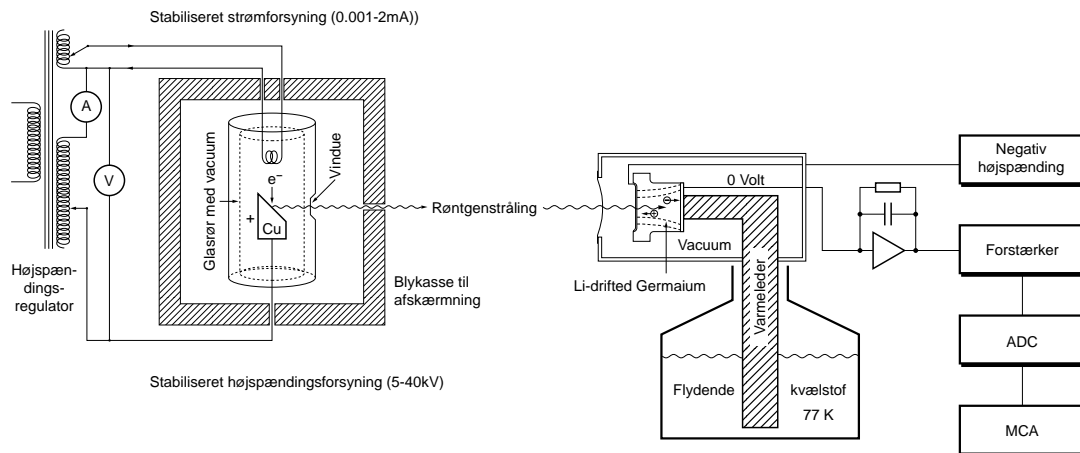
I eksperimentet, der er vist på figur 11-13, anvendes et Røntgenrør som kilde. Energien af Røntgenstrålingen dækker intervallet 0-40 keV. Til analyse af strålingen fra røret, samt absorptions- og fluorescensmålinger benyttes en Ge-detektor. Detektoren er nedkølet til 77 Kelvin (vha. flydende kvælstof) for at reducere elektronisk støj. Ved absorption af en Røntgenfoton danner Ge-detektoren en elektrisk puls hvis højde er proportional med den detekterede fotonens energi. Den elektriske puls sendes via en forstærker til en ADC (Analog \rightarrow Digital Converter), der omdanner den analoge pulshøjde til et digitalt signal, som behandles af en PC.



Figur 11: Røntgenrøret (til venstre) ses her sammen med Ge-detektoren yderst til højre, der detekterer Røntgenstrålingen.



Figur 12: Opstilling til måling af Røntgenfluorescens



Figur 13: Skematisk fremstilling af den eksperimentelle opstilling

Typisk måleprogram:

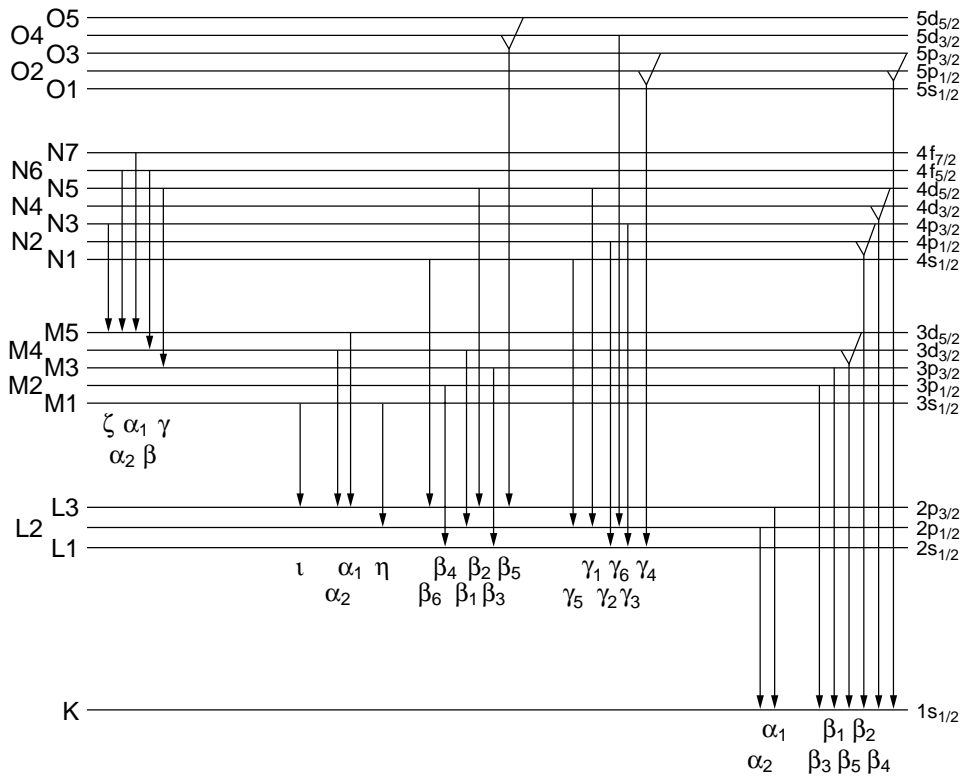
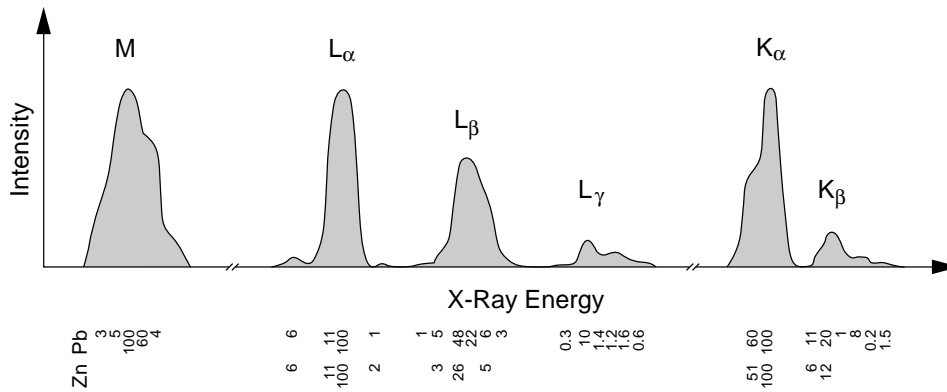
- Kalibrering af Ge-detektoren med velkendte Røntgenkilder. Typisk anvendes ^{55}Fe , ^{137}Cs og ^{241}Am (opgave 6).
- Analyse af strålingen fra Røntgenrøret. Spektre optages ved mindst to spændinger V over røret (0-40 kV) og bremsestråling samt karakteristisk stråling analyseres.
- Absorptionsmålinger på udleverede prøver. Med en fast spænding V optages spektre. Absorptionskanter identificeres og anvendes til at bestemme hvilke grundstoffer prøverne indeholder.
- Fluorescensmålinger på diverse objekter fra hverdagen (figur 12). Undersøg f.eks. hvilke grundstoffer loddetin indeholder eller test diverse smykker for urenheder. Medbring selv prøver, som skal kunne gå ned i et hul med tværsnitsareal 6 mm x 25 mm.

Opgave 6: Kalibrering (regnes i laboratoriet)

For at anvende Ge-detektoren til eksperimentet er det nødvendigt at kende den lineære sammenhæng mellem fotonenergi og pulshøjde. Til dette formål anvendes en række radioaktive materialer der udsender Røntgenstråling med kendte energier. Afslut følgende reaktionsskemaer og angiv i hvert tilfælde hvilke Røntgenlinier der kan anvendes til at kalibrere Ge-detektoren i det ønskede interval.

- 1) $^{55}\text{Fe} + e^- \rightarrow$ (elektron indfangning) \rightarrow ?
- 2) $^{137}\text{Cs} \rightarrow$ (β^- henfald) \rightarrow ?
- 3) $^{241}\text{Am} \rightarrow$ (α henfald) \rightarrow ?

Appendix 1: Røntgenovergange



Appendix 2: Røntgenenergi

| Z | Grundstof | K | Bindings-energi i keV | | | K Røntgen i keV | | | L Røntgen i keV | | | |
|-----------|------------------|----------------|-----------------------|---------------|---------------|-----------------|--------|---------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| | | | L1 | L2 | L3 | Kbeta1 | Kalfa1 | Kalfa2 | Lgamma1 | Lbeta1 | Lalfa | |
| 6 | Kulstof | .283 | | | | | | .282 | | | | |
| 7 | Kvælstof | .399 | | | | | | .392 | | | | |
| 8 | Ilt | .531 | | | | | | .523 | | | | |
| 9 | Fluor | .687 | | | | | | .677 | | | | |
| 10 | Neon | .874 | .048 | .022 | .022 | | | .851 | | | | |
| 11 | Natrium | 1.08 | .055 | .034 | .034 | 1.067 | | 1.041 | | | | |
| 12 | Magnesium | 1.303 | .063 | .050 | .049 | 1.297 | | 1.254 | | | | |
| 13 | Aluminium | 1.559 | .087 | .073 | .072 | 1.553 | | 1.487 | 1.486 | | | |
| 14 | Silicium | 1.838 | .118 | .099 | .098 | 1.832 | | 1.740 | 1.739 | | | |
| 15 | Fosfor | 2.142 | .153 | .129 | .128 | 2.136 | | 2.015 | 2.014 | | | |
| 16 | Svovl | 2.470 | .193 | .164 | .163 | 2.464 | | 2.308 | 2.306 | | | |
| 17 | Klor | 2.819 | .238 | .203 | .202 | 2.815 | | 2.622 | 2.621 | | | |
| 18 | Argon | 3.203 | .287 | .247 | .245 | 3.192 | | 2.957 | 2.955 | | | |
| 19 | Kalium | 3.607 | .341 | .297 | .294 | 3.589 | | 3.313 | 3.310 | | | |
| 20 | Calcium | 4.038 | .399 | .352 | .349 | 4.012 | | 3.691 | 3.688 | .344 | .341 | |
| 21 | Scandium | 4.496 | .462 | .411 | .406 | 4.460 | | 4.090 | 4.085 | .399 | .395 | |
| 22 | Titan | 4.964 | .530 | .460 | .454 | 4.931 | | 4.510 | 4.504 | .458 | .452 | |
| 23 | Vanadium | 5.463 | .604 | .519 | .512 | 5.427 | | 4.952 | 4.944 | .519 | .510 | |
| 24 | Krom | 5.988 | .679 | .583 | .574 | 5.946 | | 5.414 | 5.405 | .581 | .571 | |
| 25 | Mangan | 6.537 | .762 | .650 | .639 | 6.490 | | 5.898 | 5.887 | .647 | .636 | |
| 26 | Jern | 7.111 | .849 | .721 | .708 | 7.057 | | 6.403 | 6.390 | .717 | .704 | |
| 27 | Kobolt | 7.709 | .929 | .794 | .779 | 7.649 | | 6.930 | 6.915 | .790 | .775 | |
| 28 | Nikkel | 8.331 | 1.015 | .871 | .853 | 8.264 | | 7.477 | 7.460 | .866 | .849 | |
| 29 | Kobber | 8.980 | 1.100 | .953 | .933 | 8.904 | | 8.047 | 8.027 | .948 | .928 | |
| 30 | Zink | 9.660 | 1.200 | 1.045 | 1.022 | 9.571 | | 8.638 | 8.615 | 1.032 | 1.009 | |
| 31 | Gallium | 10.368 | 1.30 | 1.134 | 1.117 | 10.263 | | 9.251 | 9.234 | 1.122 | 1.096 | |
| 32 | Germanium | 11.103 | 1.42 | 1.248 | 1.217 | 10.981 | | 9.885 | 9.854 | 1.216 | 1.186 | |
| 33 | Arsen | 11.863 | 1.529 | 1.359 | 1.323 | 11.725 | | 10.543 | 10.507 | 1.317 | 1.282 | |
| 34 | Selen | 12.652 | 1.652 | 1.473 | 1.434 | 12.495 | | 11.221 | 11.181 | 1.419 | 1.379 | |
| 35 | Brom | 13.475 | 1.794 | 1.599 | 1.522 | 13.290 | | 11.923 | 11.877 | 1.526 | 1.480 | |
| 36 | Krypton | 14.323 | 1.931 | 1.727 | 1.675 | 14.112 | | 12.648 | 12.597 | 1.638 | 1.587 | |
| 37 | Rubidium | 15.201 | 2.067 | 1.866 | 1.806 | 14.960 | | 13.394 | 13.335 | 1.752 | 1.694 | |
| 38 | Strontium | 16.106 | 2.221 | 2.008 | 1.941 | 15.834 | | 14.164 | 14.097 | 1.872 | 1.806 | |
| 39 | Yttrium | 17.037 | 2.369 | 2.154 | 2.079 | 16.736 | | 14.957 | 14.882 | 1.996 | 1.922 | |
| 40 | Zirconium | 17.998 | 2.547 | 2.305 | 2.220 | 17.666 | | 15.774 | 15.690 | 2.302 | 2.124 | 2.042 |
| 41 | Niobium | 18.987 | 2.706 | 2.467 | 2.367 | 18.621 | | 16.614 | 16.520 | 2.462 | 2.257 | 2.166 |
| 42 | Molybdæn | 20.002 | 2.884 | 2.627 | 2.523 | 19.607 | | 17.478 | 17.373 | 2.623 | 2.395 | 2.293 |
| 43 | Technetium- | 21.054 | 3.054 | 2.795 | 2.677 | 20.585 | | 18.410 | 18.328 | 2.792 | 2.538 | 2.424 |
| 44 | Ruthenium | 22.118 | 3.236 | 2.966 | 2.837 | 21.655 | | 19.278 | 19.149 | 2.964 | 2.683 | 2.558 |
| 45 | Rhodium | 23.224 | 3.419 | 3.145 | 3.002 | 22.721 | | 20.214 | 20.072 | 3.144 | 2.834 | 2.696 |
| 46 | Palladium | 24.347 | 3.617 | 3.329 | 3.172 | 23.816 | | 21.175 | 21.018 | 3.328 | 2.990 | 2.838 |
| 47 | Sølv | 25.517 | 3.810 | 3.528 | 3.352 | 24.942 | | 22.162 | 21.988 | 3.519 | 3.151 | 2.984 |
| 48 | Cadmium | 26.712 | 4.019 | 3.727 | 3.538 | 26.093 | | 23.172 | 22.982 | 3.716 | 3.316 | 3.133 |
| 49 | Indium | 27.928 | 4.237 | 3.939 | 3.729 | 27.274 | | 24.207 | 24.000 | 3.920 | 3.487 | 3.287 |
| 50 | Tin | 29.190 | 4.464 | 4.157 | 3.928 | 28.483 | | 25.270 | 25.042 | 4.131 | 3.662 | 3.444 |
| 51 | Antimon | 30.486 | 4.697 | 4.381 | 4.132 | 29.723 | | 26.357 | 26.109 | 4.347 | 3.843 | 3.605 |
| 52 | Tellur | 31.809 | 4.938 | 4.613 | 4.341 | 30.993 | | 27.471 | 27.200 | 4.570 | 4.029 | 3.769 |
| 53 | Iod | 33.164 | 5.190 | 4.856 | 4.559 | 32.292 | | 28.610 | 28.315 | 4.800 | 4.220 | 3.937 |
| 54 | Xenon | 34.579 | 5.452 | 5.104 | 4.782 | 33.644 | | 29.802 | 29.485 | 5.036 | 4.422 | 4.111 |
| 55 | Cæsium | 35.959 | 5.720 | 5.358 | 5.011 | 34.984 | | 30.623 | 30.280 | 5.280 | 4.620 | 4.286 |
| 56 | Barium | 37.410 | 5.995 | 5.623 | 5.247 | 36.376 | | 32.191 | 31.815 | 5.531 | 4.828 | 4.467 |
| 57 | Lanthan | 38.931 | 6.283 | 5.894 | 5.489 | 37.799 | | 33.440 | 33.033 | 5.789 | 5.043 | 4.651 |
| 58 | Cerium | 40.449 | 6.561 | 6.165 | 5.729 | 39.255 | | 34.717 | 34.276 | 6.052 | 5.262 | 4.840 |
| 59 | Praseodym | 41.998 | 6.846 | 6.443 | 5.968 | 40.746 | | 36.023 | 35.548 | 6.322 | 5.489 | 5.034 |
| 60 | Neodym | 43.571 | 7.144 | 6.727 | 6.215 | 42.269 | | 37.359 | 36.845 | 6.602 | 5.722 | 5.230 |
| 61 | Promethium | 45.207 | 7.448 | 7.018 | 6.466 | 43.945 | | 38.649 | 38.160 | 6.891 | 5.956 | 5.431 |
| 62 | Samarium | 46.846 | 7.754 | 7.281 | 6.721 | 45.400 | | 40.124 | 39.523 | 7.180 | 6.206 | 5.636 |
| 63 | Europium | 48.515 | 8.069 | 7.624 | 6.983 | 47.027 | | 41.529 | 40.877 | 7.478 | 6.456 | 5.846 |
| 64 | Gadolinium | 50.229 | 8.393 | 7.940 | 7.252 | 48.718 | | 42.983 | 42.280 | 7.788 | 6.714 | 6.059 |
| 65 | Terbium | 51.998 | 8.724 | 8.258 | 7.519 | 50.391 | | 44.470 | 43.737 | 8.104 | 6.979 | 6.275 |
| 66 | Dysprosium | 53.789 | 9.083 | 8.621 | 7.850 | 52.178 | | 45.985 | 45.193 | 8.418 | 7.249 | 6.495 |
| 67 | Holmium | 55.615 | 9.411 | 8.920 | 8.074 | 53.934 | | 47.528 | 46.686 | 8.748 | 7.528 | 6.720 |
| 68 | Erbium | 57.483 | 9.776 | 9.263 | 8.364 | 55.690 | | 49.099 | 48.205 | 9.089 | 7.810 | 6.948 |
| 69 | Thulium | 59.335 | 10.144 | 9.628 | 8.652 | 57.576 | | 50.730 | 49.762 | 9.424 | 8.103 | 7.181 |
| 70 | Ytterbium | 61.303 | 10.486 | 9.977 | 8.943 | 59.352 | | 52.360 | 51.326 | 9.779 | 8.401 | 7.414 |
| 71 | Lutetium | 63.304 | 10.867 | 10.345 | 9.241 | 61.282 | | 54.063 | 52.959 | 10.142 | 8.708 | 7.654 |
| 72 | Hafnium | 65.313 | 11.264 | 10.734 | 9.556 | 63.209 | | 55.757 | 54.579 | 10.514 | 9.021 | 7.898 |
| 73 | Tantal | 67.400 | 11.676 | 11.130 | 9.876 | 65.210 | | 57.524 | 56.270 | 10.892 | 9.341 | 8.145 |
| 74 | Wolfram | 69.508 | 12.090 | 11.535 | 10.198 | 67.233 | | 59.310 | 57.973 | 11.283 | 9.670 | 8.396 |
| 75 | Rhenium | 71.662 | 12.522 | 11.955 | 10.531 | 69.298 | | 61.131 | 59.707 | 11.684 | 10.008 | 8.651 |
| 76 | Osmium | 73.860 | 12.965 | 12.383 | 10.869 | 71.404 | | 62.991 | 61.477 | 12.094 | 10.354 | 8.910 |
| 77 | Iridium | 76.097 | 13.413 | 12.819 | 11.211 | 73.549 | | 64.886 | 63.278 | 12.509 | 10.706 | 9.173 |
| 78 | Platin | 78.379 | 13.873 | 13.268 | 11.559 | 75.736 | | 66.820 | 65.111 | 12.939 | 11.069 | 9.441 |
| 79 | Guld | 80.713 | 14.353 | 13.733 | 11.919 | 77.968 | | 68.794 | 66.980 | 13.379 | 11.439 | 9.711 |
| 80 | Kviksølv | 83.106 | 14.841 | 14.212 | 12.285 | 80.258 | | 70.821 | 68.894 | 13.828 | 11.823 | 9.987 |
| 81 | Thallium | 85.517 | 15.346 | 14.697 | 12.657 | 82.558 | | 72.860 | 70.820 | 14.288 | 12.210 | 10.266 |
| 82 | Bly | 88.001 | 15.870 | 15.207 | 13.044 | 84.922 | | 74.957 | 72.794 | 14.762 | 12.611 | 10.549 |
| 83 | Bismuth | 90.521 | 16.393 | 15.716 | 13.424 | 87.335 | | 77.097 | 74.805 | 15.244 | 13.021 | 10.836 |
| 84 | Polonium | 93.112 | 16.935 | 16.244 | 13.817 | 89.809 | | 79.296 | 76.868 | 15.740 | 13.441 | 11.128 |
| 85 | Astat | 95.740 | 17.490 | 16.784 | 14.215 | 92.319 | | 81.525 | 78.956 | 16.248 | 13.873 | 11.424 |
| 86 | Radon | 98.418 | 18.058 | 17.337 | 14.618 | 94.877 | | 83.800 | 81.080 | 16.768 | 14.316 | 11.724 |
| 87 | Francium | 101.147 | 18.638 | 17.904 | 15.028 | 97.483 | | 86.119 | 83.243 | 17.301 | 14.770 | 12.029 |
| 88 | Radium | 103.927 | 19.233 | 18.481 | 15.442 | 100.136 | | 88.485 | 85.446 | 17.845 | 15.233 | 12.338 |
| 89 | Actinium | 106.759 | 19.842 | 19.078 | 15.865 | 102.846 | | 90.894 | 87.681 | 18.405 | 15.712 | 12.650 |
| 90 | Thorium | 109.630 | 20.460 | 19.688 | 16.296 | 105.592 | | 93.334 | 89.942 | 18.977 | 16.200 | 12.966 |
| 91 | Protactinium | 112.581 | 21.102 | 20.311 | 16.731 | 108.408 | | 95.851 | 92.271 | 19.559 | 16.700 | 13.291 |
| 92 | Uran | 115.591 | 21.753 | 20.943 | 17.163 | 111.289 | | 98.428 | 94.648 | 20.163 | 17.218 | 13.613 |
| 93 | Neptunium | 118.619 | 22.417 | 21.596 | 17.614 | 114.181 | | 101.005 | 97.023 | 20.774 | 17.740 | 13.945 |

| Z | Grundstof | K | L1 | L2 | L3 | Kbeta1 | Kalfa1 | Kalfa2 | Lgamma1 | Lbeta1 | Lalfa |
|---------------------|-----------|---|-----------------------|----|----|-----------|--------|--------|-----------|--------|-------|
| relativ intensitet: | | | | | | | | | | | |
| | | | Bindings-energi i keV | | | K Røntgen | | | L Røntgen | | |
| | | | | | | 1 | 4 | 2 | 1 | 5 | 9 |

1. udgave Christian Schori, Stig Helveg & Helge Knudsen, August 2001
2. udgave Ditte Møller, Klaus Pagh Almtoft & Helge Knudsen, Januar 2005

Institut for Fysik og Astronomi (IFA)

Aarhus Universitet, bygning 520

Ny Munkegade, 8000 Aarhus C

8942 1111

www.phys.au.dk